5К

УДК 621.317.7

В.П. Куценко[1,2], С.П. Сергієнко[3]
[1] Науково-виробниче підприємство «Кварсит»,
Укроборонпром, м. Костянтинівка, Україна
Україна, 85104, м. Костянтинівка, Донецької обл., вул. Шмідта, 20
[2] Донецький національний технічний університет МОНМС, м. Донецьк, Україна
Україна, 83000, м. Донецьк, вул. Артема, 58
[3] Донецький національний університет МОНМС, м. Донецьк, Україна
Україна, 83001, м. Донецьк, вул. Університетська, 24

Розрахунки оптимальних параметрів спрямованого хвилевідного відгалужувача і похибок перетворення низькоінтенсивних НЗВЧ-сигналів

V.P. Kutsenko[1,2], S.P. Sergienko[3]
[1] Scientific production enterprise of «Kvarsit»,
Ukroboronprom, Konstantinovka, Ukraine
Ukraine, 85104, Konstantinovka, Donetsk obl., Shmidta st., 20
[2] Donetsk national technical university, MONMS, Donetsk, Ukraine
Ukraine, 83000, Donetsk, street of Artem, 58
[3]Donetsk national university,MONMS, Donetsk, Ukraine
Ukraine, 83001, Donetsk, a street is University, 24

Calculation of Optimum Parameters of the Directed Waveguide Coupler and Errors of Transformation of Nizkointensivnykh UHF-Signals

В.П. Куценко[1, 2], С.П. Сергиенко [3]
[1] Научно-производственное предприятие «Кварсит»,
Укроборонпром, г. Константиновка, Украина
Украина, 85104, г. Константиновка, Донецкой обл., ул. Шмидта, 20
[2] Донецкий национальный технический университет, МОНМС, г. Донецк, Украина
Украина, 83000, г. Донецк, ул. Артема, 58
[3] Донецкий национальный университет, МОНМС, г. Донецк, Украина
Украина, 83001, г. Донецк, ул. Университетская, 24

Расчет оптимальных параметров направленного волноводного ответвителя и погрешностей преобразования низкоинтенсивных КВЧ-сигналов

У статті контролю проведені розрахунки оптимальних параметрів модулів і фаз елементів матриці розсіювання для вхідного каскаду радіометричної системи неруйнуючого спрямованого хвилевідного відгалужувача (СХВ), а також коефіцієнтів відбиття сигналу від усіх вхідних елементів схеми. Розраховані й побудовані графіки залежності рівня потужності сигналу на змішувачі радарної системи залежно від довжини хвилі й модулів коефіцієнтів зв'язку між плечима СХВ. Зроблені розрахунки залежності керування балансом потужностей шумів вхідних елементів високочастотного тракту без обліку корисного сигналу на вході змішувача від величини відхилення модулів коефіцієнтів відбиття від цих елементів.

Ключові слова: радарна система, вимір, оптимальні параметри, вхідні вузли, спрямований хвилевідний відгалужувач.

For the entrance cascade of the radar non-destructive checking system the calculation of optimum parameters of the modules and phases of elements of matrix of dispersion of the directed waveguide coupler (DWC) is conducted, and also reflectivities signal from all entrance elements of chart. Expected and built charts of dependence of power-level signal on the mixer of the radar system depending on a wave-length and modules of coefficients of connection between the shoulders of DWC. The calculation of dependence of management balance of powers of noises of entrance elements of high-frequency highway is done without the account of useful signal on the entrance of mixer from the size of rejection of the modules of reflectivities from these elements.
Key words: radar system, measuring, optimum parameters, entrance knots, directed waveguide coupler.

В статье проведен расчет оптимальных параметров модулей и фаз элементов матрицы рассеяния направленного волноводного ответвителя (НВО) для входного каскада радиометрической системы неразрушающего контроля, а также коэффициентов отражения сигнала от всех входных элементов схемы. Рассчитаны и построены графики зависимости уровня мощности сигнала на смесителе радарной системы в зависимости от длины волны и модулей коэффициентов связи между плечами НВО. Сделан расчет зависимости управления балансом мощностей шумов входных элементов высокочастотного тракта без учета полезного сигнала на входе смесителя от величины отклонения модулей коэффициентов отражения от этих элементов.
Ключевые слова: радарная система, измерение, оптимальные параметры, входные узлы, направленный волноводный ответвитель.

Вступ

Радіометричні системи для прийому низькоінтенсивних надзвичайно високочастотних НЗВЧ-сигналів, сумірних з власними шумами їх вхідних елементів, що працюють за принципом періодичного порівняння величин, вимагають забезпечення рівності цих шумів на вході радіоканалу [1]. Така вимога обумовлена необхідністю підвищення точності роботи цих систем і достовірного здобуття на їх виході інформації про параметри вимірюваних сигналів [2].

У радіометричних системах з періодичним порівнянням радарного типу у вхідних каскадах використовуються спрямовані хвилевідні відгалужувачі. Відмінність параметрів цих, а також інших вхідних вузлів радіометричних вимірювальних систем від оптимальних призводить до погіршення їх основних метрологічних характеристик: чутливості, точності, широкосмуговості та ін. [3].

Розрахунки високоякісних мікрохвильових вузлів, що з мінімальними похибками можуть забезпечувати перетворення низькоінтенсивних сигналів, рівень потужності яких порівнюється з паразитними шумами вхідних елементів вимірювальних радіометричних систем, є актуальним завданням у питаннях створення нових зразків радіометричної апаратури.

Метою даної статті є проведення розрахунків оптимальних параметрів спрямованого хвилевідного відгалужувача в залежності від параметрів інших вхідних вузлів НЗВЧ-радіометричної системи, що вимірює сигнали, рівень потужності яких порівняємо з власними паразитними шумами цих вхідних елементів.

Основна частина

Розвиток елементної бази техніки дозволяє сьогодні розробляти системи неруйнівного радіометричного контролю виробів із діелектричних матеріалів, які здатні забезпечити підвищення якості продукції і рентабельності виробництва.

Раніше у статтях [4-6] розглядалася функціональна схема радіометричної системи, у вхідному каскаді структури якої використовувався спрямований хвилевід-

ний відгалужувач (СХВ), була запропонована його математична модель і розраховані основні частотні характеристики. При вирішенні математичної моделі СХВ враховувалися електричні компоненти шумових сигналів від приймально-передавальної антени, навантаження, модулятора і змішувача системи [7], [8].

Для наочності проведених у статті розрахунків оптимальних параметрів СХВ і похибок перетворення низькоінтенсивних НЗВЧ-сигналів на рис. 1 наведена вхідна частина функціональної схеми радіометричної системи.

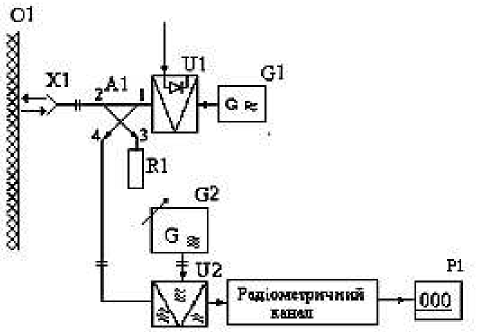


Рисунок 1 – Вхідна частина функціональної схеми радіометричної системи

Розрахунки проводилися для низькоінтенсивних сигналів на основі системи рівнянь залежності вихідних сигналів СХВ – від параметрів його матриці розсіювання S^{i}_{mn}, коефіцієнтів відбиття та електричних компонентів шумових корисних і паразитних сигналів вхідних елементів, а також граничних умов на полюсах узагальненого восьмиполюсника (СХВ) в і-му стаціонарному стані з використанням програми Mathcad і методу Крамера.

З метою проведення розрахунків оптимальних параметрів СХВ складалася цільова функція оптимізації. Збалансований режим роботи вхідної частини радіометричної системи забезпечується рівністю потужностей шумів високочастотного тракту у відсутності вимірюваного сигналу. У даній моделі ця умова відповідає рівності нулю наступної функції:

$$\begin{aligned} E_V(\arg_{01}, M_{01}, M_{02}, \arg_{02}, M_{03}, \arg_{03}, M_{12}, \arg_{12}, \arg_{13}, M_{13}, \arg_{23}, M_{23}, G_a, g_a, g_o, G_{Rn}, g_{Rn}, G_3, g_3, \lambda) = \\ = [E_{eo}(1) + E_{e3}(1) + E_{eRn}(1) + E_{eav}(1)] - [E_{eo}(0{,}2) + E_{e3}(0{,}2) + E_{eRn}(0{,}2) + E_{eav}(0{,}2)], \end{aligned} \quad (1)$$

де E_V – функція оптимізації рівня потужностей шумів; $\arg_{01}$ – фаза елемента матриці розсіювання S_{12}; M_{01} – модуль елемента матриці розсіювання S_{12}; M_{02} – модуль елемента матриці розсіювання S_{13}; $\arg_{02}$ – фаза елемента матриці розсіювання S_{13}; M_{03} – модуль елемента матриці розсіювання S_{14}; $\arg_{03}$ – фаза елемента матриці розсіювання S_{14}; M_{12} – модуль елемента матриці розсіювання S_{23}; $\arg_{12}$ – фаза елемента матриці розсіювання S_{23}; $\arg_{13}$ – фаза елемента матриці розсіювання S_{24}; M_{13} – модуль елемента матриці розсіювання S_{24}; $\arg_{23}$ – фаза елемента матриці розсіювання S_{34}; M_{23} – модуль елемента матриці розсіювання S_{34}; g_a, G_a – відповідно фаза і модуль коефіцієнта відбиття Γ_a від антени; g_0 – фаза коефіцієнта відбиття Γ_1 від модулятора; g_{Rn}, G_{Rn} – фаза і модуль коефіцієнта відбиття Γ_{Rn} від еквівалентного опору; g_3, G_3 – фаза і модуль коефіцієнта відбиття Γ_4 від змішувача; λ – довга хвилі вихідного сигналу; E_e – рівень потужності шумів відповідно від антени, модулятора, еквівалентного опору і змішувача при двох значеннях модуля коефіцієнта відбиття Γ_1 від модулятора 1 і 0,2.

Дана функція (1) представляє залежність різниці від суми потужностей шумів при значенні модуля коефіцієнта відбиття Γ_1 від модулятора, рівного 1, і суми потужностей при рівності модуля коефіцієнта відбиття Γ_1 від модулятора, рівного 0,2.

Оптимізація параметрів СХВ здійснювалася досягненням максимуму різниці потужностей корисного сигналу за умови виконання рівності суми потужностей усіх шумів за винятком корисного сигналу на вході змішувача при двох значеннях модуля коефіцієнта відбиття Γ_1 від модулятора 1 $E_{ec}(1)$ і 0,2 $E_{ec}(0{,}2)$:

$$O(\arg_{01}, M_{01}, M_{02}, \arg_{02}, M_{03}, \arg_{03}, M_{12}, \arg_{12}, \arg_{13}, M_{13}, \arg_{23}, M_{23}, G_a, g_a, g_o, G_{Rn}, g_{Rn}, G_3, g_3, \lambda) =$$
$$= [E_{ec}(1) - E_{ec}(0{,}2)]. \qquad (2)$$

Враховуючи, що СХВ з прилеглими вхідними вузлами є лінійними і що корисний сигнал і шуми взаємно не корельовано, розрахунок вкладу окремих джерел шумів проводився незалежно, з подальшим підсумовуванням їх дисперсій. Розрахунок електричних компонентів власних шумів змішувача в СХВ проводився за формулою Найквіста [1].

Сигнали, що виходять з СХВ, являються сумою всіх шумів, що входять в нього. Через їх некорельованість допустиме підсумовування їх потужностей без врахування фазових співвідношень.

Результати оптимізації параметрів СХВ вхідної частини функціональної схеми радіометричної системи в умовах низькоінтенсивних сигналів наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати оптимізації параметрів СХВ вхідної частини функціональної схеми радіометричної системи в умовах низькоінтенсивних сигналів

$\arg_{01}$	M_{01}	M_{02}	$\arg_{02}$	M_{03}	$\arg_{03}$	M_{12}	$\arg_{12}$	$\arg_{13}$	M_{13}
0,25	0,818	0,285	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,25	0,285
$\arg_{23}$	M_{23}	G_a	g_a	g_0	G_{Rn}	g_{Rn}	G_3	g_3	λ
0,25	0,818	0,415	0,5	0,25	0,125	0,25	0,508	0,25	7,352

Проведена оптимізація параметрів СХВ, що відбувається у вхідній частині функціональної схеми радіометричної системи (рис. 1) в умовах низькоінтенсивних сигналів, дозволила побудувати наступні графіки (рис. 2).

На рис. 2 видно, що зі збільшенням довжини хвилі збільшується й потужність корисного сигналу на змішувачі. Однак зміна значень величин модулів елементів матриці розсіювання S_{mn} по-різному впливає на величину потужності сигналу на змішувачі. Так, наприклад, максимальне значення потужності сигналу на змішувачі досягається при M_{13} = 0,2 – 0,3 (рис. 2а), при M_{03} = 0,6 – 0,7 (рис. 2г), при M_{01} = 0,8 (рис. 2е) і практично не залежить від зміни величин модулів елементів матриці розсіювання M_{23} (рис. 2б), M_{12} (рис. 2в) і M_{02} (рис. 2д). У той же час, як видно з табл. 1, для досягнення рівності шумів від усіх вхідних елементів на вході змішувача для обох станів модулятора оптимальні значення цих величин повинні бути трохи іншими.

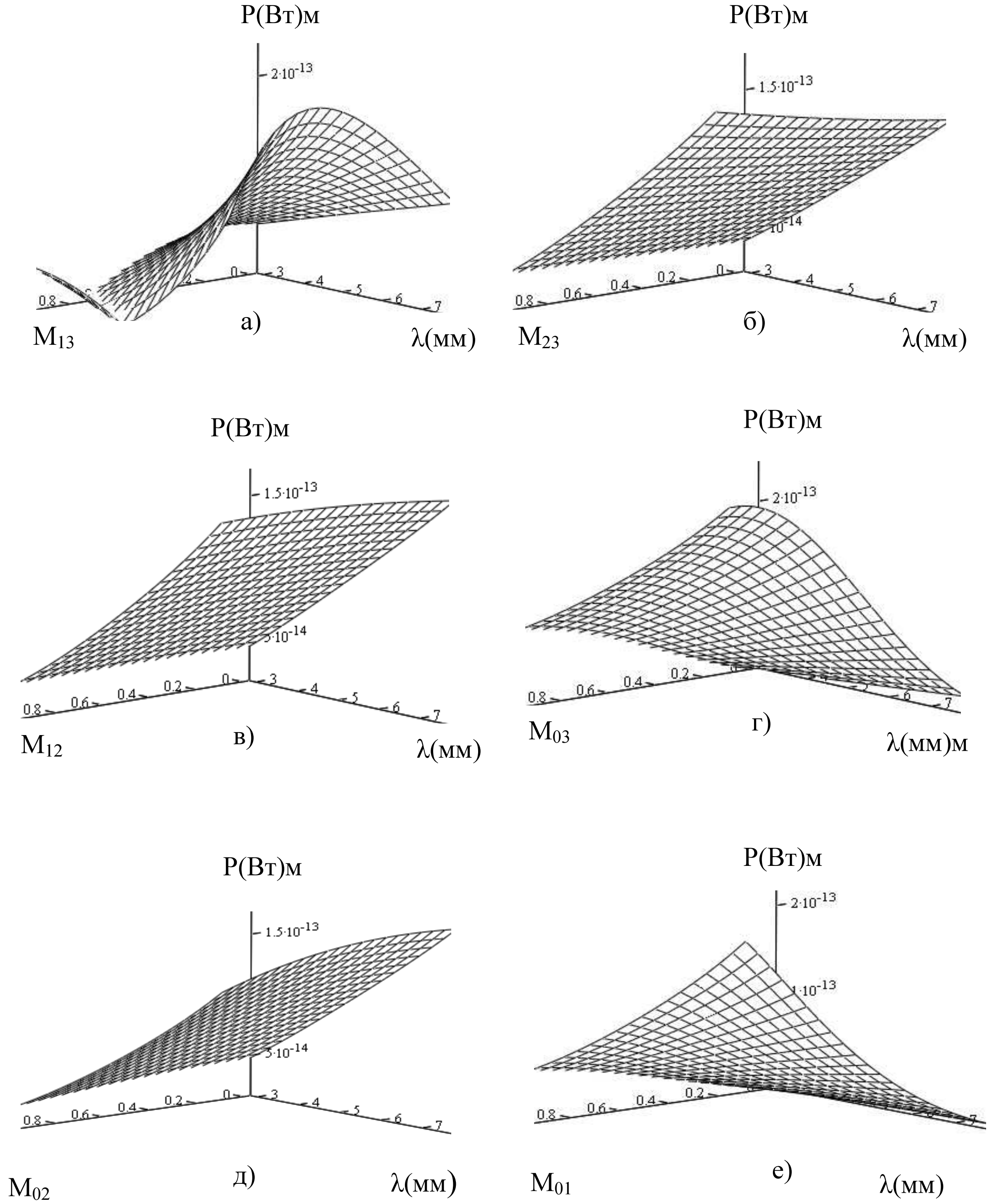


Рисунок 2 – Графіки залежності рівня потужності вихідного сигналу на змішувачі залежно від довжини хвилі і модуля елемента матриці розсіювання а) S_{24}, б) S_{34}, в) S_{23}, г) S_{14}, д) S_{13} і е) S_{12}

Графік залежності управління балансом потужностей шумів вхідних елементів високочастотного тракту (рис. 3) показує, що найбільшу похибку при вимірі низько-інтенсивних сигналів буде давати відхилення від оптимальних значень модуля коефіцієнта відбиття еквівалентного опору. Забезпечення балансу шумів вхідних

елементів на змішувачі технічно простіше реалізувати шляхом зміни модулів коефіцієнтів відбиття від змішувача й погодженого опору. У той же час не раціональним є зміна модуля коефіцієнта відбиття від антени, що призведе до зменшення корисного сигналу.

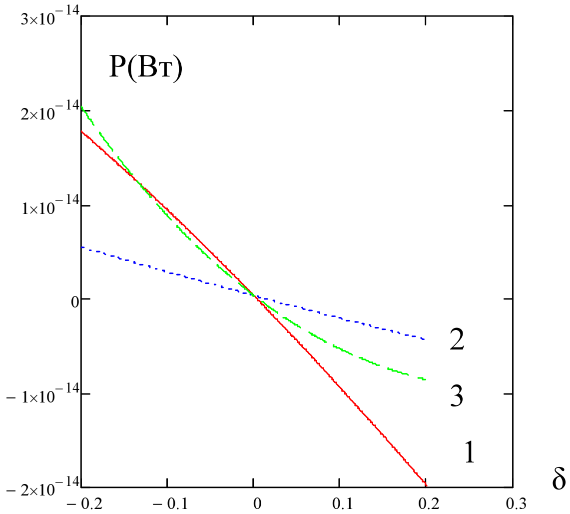


Рисунок 3 – Графік залежності балансу потужностей шумів вхідних елементів високочастотного тракту (1 – від модуля коефіцієнта відбиття антени, 2 – від модуля коефіцієнта відбиття від еквівалентного опору, 3 – від модуля коефіцієнта відбиття змішувача) без врахування корисного сигналу на вході змішувача

Для визначення залежності балансування вхідного НЗВЧ-блоку радіометричної системи за допомогою зміни модуля відбиття від «погодженого опору» при неоптимальному фазовому коефіцієнті відбиття від вимірюваного об’єкта запишемо функцію:

$$T(g,g_1)=E_V(G_0,G_1,G_2,G_3,G_4,G_5,G_6,G_7,G_8,G_9,G_{10},G_{11},G_{12},G_{13}+g_1G_{13},G_{14},G_{15}+gG_{15},G_{16},G_{17},G_{18},G_{19}).\ (3)$$

Її розрахунки дозволили побудувати графік (рис. 4а), на якому представлена залежність потужності власних шумів вхідного блоку від ступеня відхилення від оптимальних параметрів модуля коефіцієнта відбиття від опору й відхилення від оптимального фазового коефіцієнта відбиття від вимірюваного об’єкта.

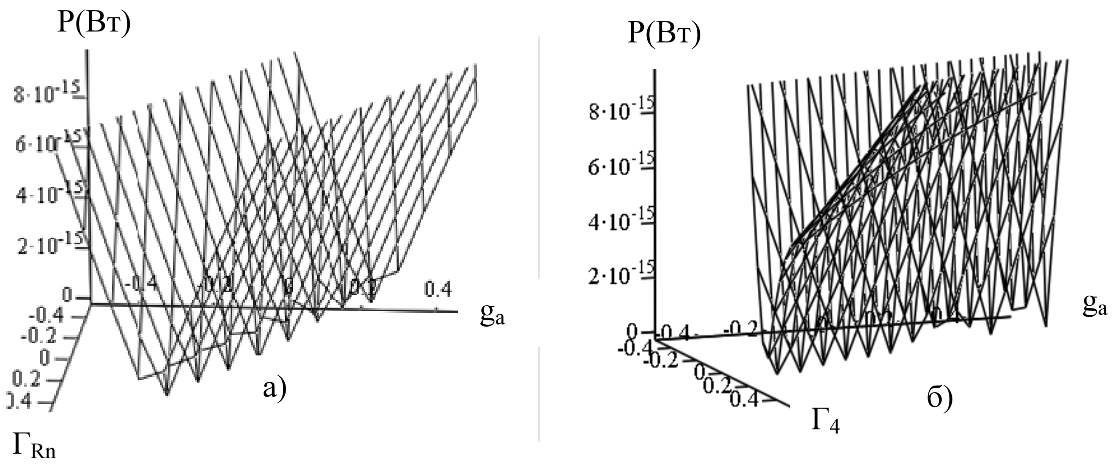


Рисунок 4 – Графіки залежності потужності власних шумів вхідного блоку від ступеня відхилення від оптимальних параметрів модуля коефіцієнта відбиття від
а) опору і б) змішувача й відхилення від оптимального фазового коефіцієнта відбиття від вимірюваного об’єкта

Залежність балансування вхідного НЗВЧ-блоку радіометричної системи за допомогою зміни модуля відбиття від змішувача при неоптимальному фазовому коефіцієнті відбиття від вимірюваного об'єкта може бути визначена функцією:

$$T(g,g_1)=E_V(G_0,G_1,G_2,G_3,G_4,G_5,G_6,G_7,G_8,G_9,G_{10},G_{11},G_{12},G_{13}+g_1G_{13},G_{14},G_{15},G_{16},G_{17}+gG_{17},G_{18},G_{19}). \quad (4)$$

Графік (рис. 4б) залежності потужності власних шумів вхідного блоку від ступеня відхилення від оптимальних параметрів модуля коефіцієнта відбиття від змішувача й відхилення від оптимального фазового коефіцієнта відбиття від вимірюваного об'єкта, отриманий при розрахунках функції (4).

Область коефіцієнтів, при яких забезпечується балансування вхідного блоку (потужність власних шумів при вимірі коефіцієнта відбиття від модулятора не міняється), – це область перетинання графіка із площиною $T(g,g_1) = 0$.

Як видно із графіків (рис. 4), управління балансом потужностей найбільш ефективно здійснюється за допомогою зміни модуля коефіцієнта відбиття від погодженого опору, тому що нестабільність балансу потужностей від випадкової флуктуації керуючого параметра вище для управління за допомогою зміни модуля коефіцієнта відбиття від змішувача.

Проведення оптимізації дозволяє збільшити швидкість розробки нових НЗВЧ-пристроїв, прогнозувати забезпечення точності роботи системи, що задається.

Висновки

Для досягнення рівності шумів від усіх вхідних НЗВЧ-елементів на вході змішувача для обох станів модулятора за допомогою матричного аналізу, програми Mathcad і методу Крамера отримані оптимальні параметри СХВ вхідної частини функціональної схеми в умовах низькоінтенсивних сигналів.

Розрахунки показують, що зі збільшенням довжини хвилі збільшується й потужність корисного сигналу на змішувачі.

Найбільш виражена залежність потужності корисного сигналу на змішувачі від зміни значень величин модулів елементів матриці розсіювання S_{mn} між плечами 1-2, 1-4, 2-4 і практично не залежить від зміни величин модулів елементів матриці розсіювання між плечами 3-4, 2-3 і 1-3.

Найбільшу похибку при вимірі низькоінтенсивних сигналів вносять відхилення від оптимальних значень шумів еквівалентного опору.

Виготовлення СХВ без відхилення його параметрів від оптимальних неможливо, що передбачає установку коригувальних елементів, які забезпечують баланс шумів на вході змішувача. Розрахунки оптимального режиму роботи вхідного НЗВЧ-блоку показали, що для забезпечення балансування найбільш зручно використовувати зміни коефіцієнта відбиття від погодженого опору, тому що крутість характеристики зміни потужності шумів від модуля коефіцієнта відбиття лінійна. А зміною модуля коефіцієнта відбиття від навантаження найбільш ефективно можна коректувати відхилення від оптимальної фази коефіцієнта відбиття від погодженого опору.

Результати проведеної оптимізації дозволяють прогнозувати і забезпечувати підвищення точності роботи системи.

Література

1. Куценко В.П. Методы и средства сверхвысокочастотной радиометрии / Куценко В.П., Скрипник Ю.А., Трегубов Н.Ф., Шевченко К.Л., Яненко А.Ф. – Донецк : ІПШІ «Наука і освіта», 2011. – 324 с.

2. Головко Д.Б. Сверхвысокочастотные методы и средства измерения физических величин : [учебное пособие] / Головко Д.Б., Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф. – К. : Лебедь, 2003. – С. 72-74.
3. Скрипник Ю.А. Микроволновая радиометрия физических и биологических объектов / [Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф., Манойлов В.П., Куценко В.П., Гимпилевич Ю.Б.]. – Житомир : «Волынь», 2003. – 408 с.
4. Куценко В.П. Оптимізація параметрів вхідних вузлів НЗВЧ-радарних систем в умовах низькоінтенсивних сигналів / В.П. Куценко, С.П. Сергиенко, М.Ф. Трегубов, В.А. Сидоренко // Штучний інтелект. – 2012. – № 4. – С. 489-498.
5. Куценко В.П. Аналіз підходів до розрахунків вхідних елементів НЗВЧ-радіометрів, як основних джерел похибок вимірювання низькоінтенсивних сигналів / В.П. Куценко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – Серія «Обчислювальна техніка та автоматизація». – Вип. 20 (182). – Донецьк : ДонНТУ, 2012. – С. 199-205.
6. Kutsenko W.P. Control-measuring complex / W.P. Kutsenko, N.F. Tregubov // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – Спецвипуск. – Черкаси : «Брама Україна», 2009. – С. 57-59.
7. Куценко В.П. Математична модель направленого хвилевідного відгалужувача в умовах низькоінтенсивних сигналів / В.П. Куценко // Вісник Житомирського державного технічного університета. – Серія «Технічні науки». – Вип. 2 (53) / 2010. – Житомир : ЖДТУ, 2010. – С. 118-123.
8. Силаев М.А. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ-устройств / М.А. Силаев, С.Ф. Брянцев. – М. : Изд. Сов. радио, 1970. – 248 с.

Literatura

1. Kutsenko V.P. Methods and facilities of super-high-frequency radiometry / Kutsenko V.P., Skripnik Yu.A., Tregubov N.F., Shevchenko K.L., Yanenko A.F. is Donetsk: IPSHI «Science and education», 2011. – 324 s.
2. Golovko D.B., Skripnik Yu.A., Yanenko A.F. Super-high-frequency methods and facilities of measuring of physical sizes : Train aid. – K. : Swan. – 2003. – S. 72-74.
3. Skripnik Yu.a., Yanenko a.f., Manoylov V.P., Kutsenko V.P., Gimpilevich U.B. Microwave radiometry of physical and biological objects. it is Zhitomir : «Volhynia». – 2003. – 408 s.
4. Kutsenko V.P., Sergienko S.P., Tregubov N.F., Sidorenko V.A. Optimization of parameters of entrance knots of СВЧ-радіо of the systems in the conditions of low intensive signals // the Theoretical magazine «Artificial intelligence» is Producing. 4/2012. it is Donetsk. Institute of problems of artificial intelligence METAL-OXIDE-SEMICONDUCTOR and NAN of Ukraine, 2012. – С. 489-498.
5. Kutsenko V.P. Analysis of going near the calculations of entrance elements of radiometers, as basic sources of errors of measuring of niz'kointensivnikh signals of // Scientific labours of the Donetsk national technical university. are Series the «Computing engineering and automation». – Vip. 20 (182) it is Donetsk. DONNTU, 2012. – S.199-205.
6. Kutsenko V.P., Tregubov N.F. Control-measuring complex // Announcer of the Tcherkasy state technological university, is the Specproducing. are Tcherkasy. «Gates are Ukraine», 2009. – С. 57-59.
7. Kutsenko V.P. Mathematical model of directed UHF waveguide coupler in the conditions of low intensive signals // Announcer of Zhytomyr state technical university is Series «Engineering sciences» it is Producing 2(53) /2010 it is Zhytomyr. 2010. – С. 118-123.
8. Silaev Ì.À., Bryancev S.F. Appendix of matrices and counts to the analysis SVCH devices. – M. : of Publ. of Owls. Radio, 1970. – 248 p.

RESUME

V.P. Kutsenko, S.P. Sergienko

Calculation of Optimum Parameters of the Directed Waveguide Coupler and Errors of Transformation of Nizkointensivnykh UHF-Signals

For the entrance cascade of the aerophare non-destructive checking system the calculation of optimal parameters of the modules and phases of elements of matrix of dispersion of the directed waveguide coupler(HBO) is conducted, and also reflectivities of signal from all entrance elements of chart. The charts of dependence of power-level of

signal are expected and built on the mixer of the radar system depending on a wave-length and modules of coefficients of connection between the shoulders of HBO. The calculation of management dependence is done by balance of powers of noises of entrance elements of high-frequency highway without the account of useful signal on the entrance of mixer from the size of rejection of the modules of reflectivities from these elements.

The charts of dependence of power of own noises of entry block are got from the degree of deviation from the optimal parameters of the module of reflectivity from resistance and deviation from an optimal phase reflectivity from the measured object and power of own noises of entry block from the degree of deviation from the optimal parameters of the module of reflectivity from a mixer and deviation from an optimal phase reflectivity from the measured object.

The calculations of the optimal mode of operations of entry НЗВЧ-блока showed that for providing of balancing more than all it comfortably to use the changes of reflectivity from the concerted resistance because the transconductance of change of power of noises from the module of reflection is linear. And by the change of the module of reflection from loading more than all it is effectively possible to correct deviation from the optimal phase of reflection from the concerted resistance.

Стаття надійшла до редакції 21.11.2012.